

УДК538.91:536.425:669.295'24'3

**А. А. Дядечко*, А. В. Шеляков, Н. Н. Ситников,
К. А. Бородако**

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва

*kalba169@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ЛЕНТ ИЗ СПЛАВОВ TiNiCu С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ МЕДИ

Аморфные сплавы системы TiNi–TiCu с содержанием меди от 25 до 40 ат. % получены методом спиннингования расплава в виде лент толщиной 30–50 мкм. Показано, что по сравнению с изотермическим отжигом высокоскоростная электроимпульсная термообработка приводит к резкому улучшению пластичности сплавов и характеристик эффектов памяти формы.

Ключевые слова: сплавы с эффектом памяти формы, мартенситное превращение, быстрая закалка из расплава, электроимпульсная обработка.

**A. A. Diadechko, A. V. Shelyakov, N. N. Sitnikov,
K. A. Borodako**

RESEARCH OF RAPIDLY QUENCHED RIBBONS OF TINICU ALLOYS WITH HIGH COPPER CONTENT

Amorphous alloys of the TiNi–TiCu system with a copper content of 25 to 40 at. % were obtained by melt spinning technique in the form of 30–50 μm thick ribbons. It is shown that, compared to isothermal annealing, high-speed electropulse heat treatment leads to a dramatic improvement in the ductility of alloys and characteristics of shape memory effects.

Key words: shape memory alloys, martensitic transformation, rapid quenching from melt, electropulse treatment.

Сплавы с памятью формы являются ярким представителем так называемых «умных» материалов. Это связано с уникальными и особенными функциональными свойствами, проявляемыми эти-

ми сплавами, такими, как, например, односторонний эффект памяти формы (ЭПФ), обратимый (двусторонний) ЭПФ (ОЭПФ), сверхупругость, высокая демпфирующая способность, хорошая химическая стойкость и биосовместимость [1, 2]. Для создания быстродействующих устройств требуются тонкие материалы с ЭПФ, обладающие узким гистерезисом фазовых мартенситных превращений (МП). Одним из вариантов таких материалов являются тонкие ленты из сплавов TiNi-NiCu с высоким содержанием меди (более 20 ат. %). Ленты получают в аморфном состоянии методом быстрой закалки из расплава, последующая их кристаллизация приводит к появлению ярко выраженного ЭПФ, но при этом в структуре могут возникать фазы Ti-Cu, которые охрупчивают сплавы и препятствуют протеканию МП. В данной работе исследовалась зависимость характеристик ЭПФ в быстрозакаленных сплавах TiNiCu от содержания меди и параметров кристаллизации.

Аморфные сплавы системы TiNi-TiCu с содержанием меди от 25 до 40 ат. % получали методом спиннингования расплава со скоростью охлаждения расплава около 10^6 К/св виде лент толщиной от 30 до 50 мкм и шириной от 7 до 20 мм.

Кристаллизация сплавов проводилась двумя способами: изотермическим отжигом при 500 °С с варьируемой длительностью и электроимпульсной термообработкой, которая осуществлялась пропусканием через образец короткого импульса электрического тока длительностью 5 мс, обеспечивающего нагрев образца до температуры кристаллизации за счет выделения джоулева тепла.

Термомеханические характеристики сплавов исследовались методом испытаний на изгиб [3]. Установлено, что с ростом содержания меди и увеличением времени термообработки образцы заметно охрупчиваются. Как показали структурные исследования, это явление связано с формированием в структуре сплавов хрупкой фазы Ti-Cu. Высокоскоростная электроимпульсная кристаллизация в значительной степени предотвращает образование этой фазы, что приводит к резкому увеличению пластичности сплавов с содержанием меди более 30 ат. %.

Результаты исследования ЭПФ в быстрозакаленных лентах показали, что в изотермически кристаллизованных сплавах увеличение содержания меди более 30 ат. % приводит к резкому снижению величины ОЭПФ или к его исчезновению: в сплаве с 40 ат. % Cu не удалось по-

лучить ОЭПФ из-за его хрупкости, а в сплаве с 35 ат. % Cu по этой же причине обнаружена лишь небольшая обратимая деформация. И только радикальное уменьшение времени кристаллизации до 5 мс с помощью электроимпульсной термообработки приводит к появлению заметного ОЭПФ не только в сплаве с 35 ат. % Cu, но и в сплаве с 40 ат. % Cu (до 0,3 %), что обусловлено существенным изменением кристаллической структуры этих сплавов.

Работа выполнена за счет гранта РНФ (проект № 19–12–00327).

Литература

1. Otsuka K., Ren X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys // Progress in Materials Science. 2005. V. 50. P. 511–678.
2. Eds. Advances in Shape Memory Materials / Q. Sun [et al.] // Springer Int. Pub. AG. 2017. 241 p.
3. Глезер А. М., Шурыгина М. А. Аморфно-нанокристаллические сплавы. М. : Физматлит, 2013. 29–30 с.